

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

簡素なデジタルスパイキングニューラルネットの解析と応用

著者	大石 侑弥
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	62
ページ	1-5
発行年	2021-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00023925

簡素なデジタルスパイクング ニューラルネットの解析と応用

Analysis and applications of simple digital spiking neural networks

大石 侑弥

Yuya Oishi

指導教員 斎藤利通

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper considers the various connection system of Digital Spiking Neurons (DSN) and Digital Spiking Neural Network (DSNN) for spike-train approximation. First, we consider the DSN. Repeats integrate-and-fire between a base signal and threshold, DSN can generate various PST. Second, we present a delay connection. It is consisted of cross-firing connection and two DSNs, and generate a synchronization phenomenon. we consider uni-directional ring-type DSN and bi-directional ring-type DSN. These coupling systems are constructed by applying delayed connection to multiple DSNs, and can generate the multi-phase synchronization phenomenon. We consider the synchronization phenomenon of two coupling systems and consider the application to the walking motion of a robot. Third, we consider the DSNN. DSNN can output various PST that cannot be output by a single DSN. In order to realize approximation of spike-trains, a DSN selection system is applied to the DSNN. We define the approximation error and consider the approximation accuracy. Finally, we implement FPGA and confirm typical synchronization phenomenon and spike train approximation.

Key Words : *spiking neural networks, synchronization, spike train approximation*

1. はじめに

アナログスパイクングニューロンはアナログ力学系の一種であり、積分と発火動作を繰り返し、様々なスパイク列を生成することができる。その動作を解析することは、非線形現象の基本問題として重要であるばかりでなく、ニューロンによる情報処理機構の解明と工学的応用に対しても重要である[1][2]。デジタルスパイクングニューロン (DSN) は時間と状態が離散的なデジタル力学系であり、アナログスパイクングニューロンのデジタル版である。積分と発火の動作を繰り返し様々な周期スパイク列を出力することができる[3]-[5]。

本論文ではDSNを構成要素とするネットワークの同期現象解析とスパイク列近似への応用を考察する。DSNの構成するネットワークは、DSNに誘導発火接続を適用することにより構成され、様々な同期現象を呈することができる。工学的応用としては、通信システムの符号生成器[6] やセントラルパターンジェネレータ[7]などが考えられる。一般的なネットワークの議論は困難であるため、本論文では基本的なネットワークを考察する。まず、2つのDSNを結合した場合、同期現象を呈することを示す。次に、

4つのDSNをリング結合した場合、4相同期現象を呈することを示す。さらに、4つのDSNを双方向リング結合した場合、2つの2相同期現象が初期値に対して共存することを示す。これらの同期現象の安定性は保証されている[4][5]。次に、DSNNのスパイク列近似への応用を考える。リング型に結合されたDSNに時変選択スイッチを適応し、出力層と結合することでDSNNを構成する。DSNNは単体のDSNでは表すことのできない多彩なスパイク列を出力する。教師信号を定義し、教師信号に対して最も近いスパイクを選択するシステムをDSNNに適応することでスパイク列近似を可能にする。DSN、及びそのネットワークは背精密な動作解析やFPGAに基づくハードウェア実装に適している。DSNは2つのシフトレジスタを用いて構成でき、遅延結合はDフリップフロップ等を用いて実現できる。ハードウェアで実装するために、基本的なDSNやネットワークをVerilogによって設計し、典型的な同期現象の発生を確認する。このような結果は、様々な結合のDSNNの動作解析と、その工学的応用へ発展していくものと思われる。

2. デジタルスパイクニューロン

DSN は周期的なベース信号と一定のしきい値の間で積分と発火の動作を繰り返し、スパイク列 $y(\tau)$ を出力する。ダイナミクスは次式で記述される。

$$\text{積分} \begin{cases} x(\tau+1) = x(\tau) + 1 & \text{if } x(\tau) < N_x \\ y(\tau) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{自己発火} \begin{cases} x(\tau+1) = b(\tau) & \text{if } x(\tau) = N_x \\ y(\tau) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 τ は離散時間、 x は τ における離散状態変数である。 N_x はしきい値、 $b(\tau)$ は周期 N_p のベース信号である。ベース信号の周期 N_p を基本周期と呼ぶ。式(1), (2) で定義されるDSNを図1の図で表すことにする。DSNの動作を図2に示す。

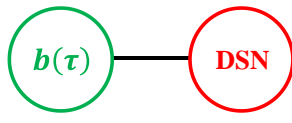


図1 DSNの簡略図

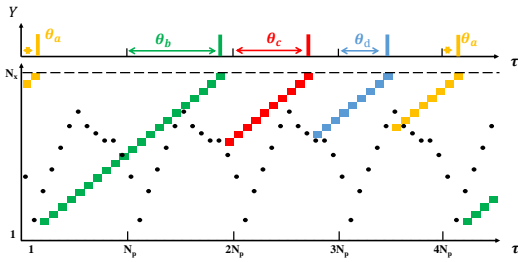


図2 DSNの動作

状態変数を $x(\tau) \in \{0, 1, \dots, N_x\}$, $N_x \leq 2N_p - 1$ とする。ベース信号に次の条件を与える。

$$\tau - 2N_p + 1 \leq b(\tau) - N_x \leq 2N_p - 1 \quad (3)$$

$$\text{for } \tau \in \{0, \dots, N_p - 1\}, b(\tau + N_p) = b(\tau)$$

この時、スパイクは1つの基本周期に1本たつ。そのスパイク列は次式で与えられる。

$$y(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{for } \tau = \tau_n \\ 0 & \text{for } \tau \neq \tau_n \end{cases} \quad \tau_n \in [(n-1)N_p + 1, nN_p] \quad (4)$$

ただし、 τ_n は n 番目のスパイク位置である。 τ_{n+1} は τ_n で与えられる：

$$\tau_{n+1} = \tau_n - b(\tau_n) + N_x + 1 \quad (5)$$

ここで、 n 番目のスパイク位相を $\theta n = \tau_n \bmod 1$ とする。これを用いると次式を得る：

$$\theta_{n+1} = F(\theta n), \quad \theta \in \{1, \dots, N_p\} \equiv L N_p \quad (6)$$

これをデジタルスパイクマップ(Dmap)と呼ぶ。DSNの生成する周期スパイク列(PST)はDmapに支配される。図2(a)のDSNのPSTは図3のDmapで表される。

ここで、基本的な定義を行う。点 $p \in L N_p$ が、 $p = Fk(p)$ かつ $F(p)$ から $fk(p)$ が全て異なる場合、点 p は周期 k の周期点とよぶ。 Fk は F の k 回写像を意味している。周期点の系列 $\{F(p), \dots, Fk(p)\}$ を周期軌道とよぶ。点 $q \in L N_p$ が周期点ではなく、 k 回の写像 $Fk(q)$ で周期点 p に落ち込むとき、点を q ステップ k のE周期点とよぶ。E周期点は過渡現象を表す。図2のDSNのPSTは図3のDmapで表される。

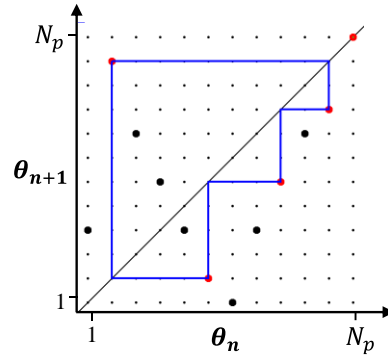


図3 Dmap (4周期PST)

3. DSN のネットワーク

様々なDSNNを考えるために、まず、2つのDSNの遅延結合を定義する。2つのDSNは共通のベース信号を持ち、遅延結合のダイナミクスは以下の式で表される。

$$\text{積分} \begin{cases} x_1(\tau+1) = x_1(\tau) + 1 & \text{if } x_1(\tau) < N_x \\ y_1(\tau) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_2(\tau+1) = x_2(\tau) + 1 & \text{if } x_2(\tau) < N_x \\ y_2(\tau) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{自己発火} \begin{cases} x_1(\tau+1) = b(\tau) & \text{if } x_1(\tau) = N_x \\ y_1(\tau) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_1(\tau+1) = b(\tau) & \text{if } x_1(\tau) = N_x \\ y_1(\tau) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{誘導発火} \begin{cases} x_2(\tau+1) = N_x - N_p + 1 \\ \text{if } x_1(\tau) = N_x \text{ and } x_2(\tau) \leq N_x - N_p \end{cases} \quad (11)$$

この誘導発火によって、DSN1とDSN2はDSN1からDSN2の方向に遅延結合されている。誘導発火を図4の矢印で示すことにする。DSN1とDSN2は結合前に同じPSTを出力している場合、この誘導発火により、DSN2の出力を1周期 N_p 遅れにすることができる。波形例を図5に示す。

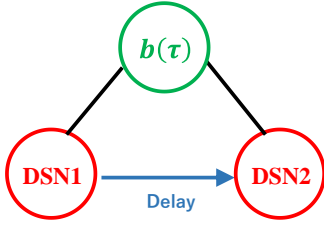


図4 遅延結合

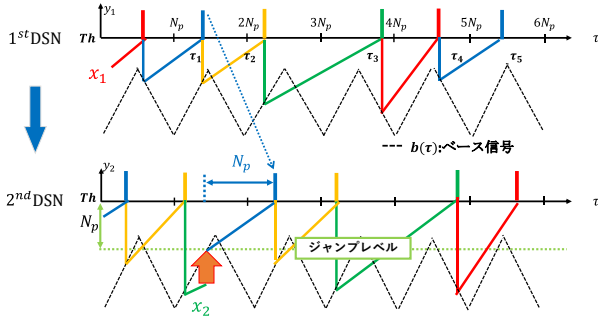


図5 誘導発火

複数のDSNが図3のDmapによって記述される4周期PSTを生成する場合を対象として、いくつかのネットワークを考える。本論文では、4つのDSNで構成されるネットワークを考える。図6に片方向リング結合を示す。図中の矢印は先に定義した誘導発火による遅延結合を示す。このネットワークは4周期PSTの4相同期現象を呈する。図7にPSTを示す。

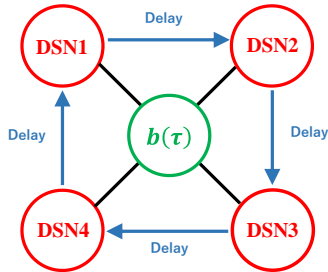


図6 片方向リング結合

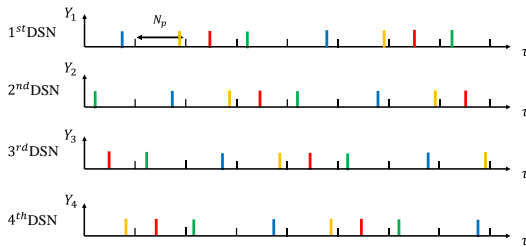


図7 片方向リング結合の同期現象

図8に双方向リング結合を示す。このネットワークでは、DSN1とDSN2が2周期PSTの2相同期現象を呈し、DSN3とDSN4も2周期PSTの2相同期現象を呈する。DSN1とDSN3、DSN2とDSN4は直接つながっていないが、ベース信号が共通なので同相となる。図9にPSTを示す。

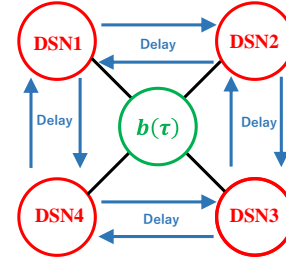


図8 双方向リング結合

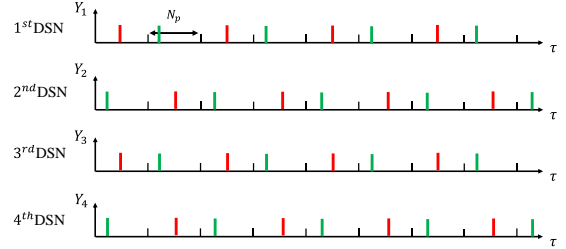


図9 双方向リング結合の同期現象

4. デジタルスパイクニューラルネットとスパイク列近似

図10にDSNNを示す。DSNNは、片方向リング結合のそれぞれのDSNに時変選択スイッチ S_i を接続し、スイッチを介して出力層へと結合することで構成される。本章では、6つのDSNで構成される片方向リング結合を用いる。この片方向リング結合は6周期スパイク列の6相同期現象を実現することができるとする。DSNNの出力するスパイク列 y は、 S_i の動作を表現する選択行列 $W = w_{ij}$ によって決定される：

$$y(\tau) = \sum_{i=1}^6 w_{ij} y_i(\tau) \text{ for } \tau \in I_j \quad (12)$$

$$j \in \{1, \dots, 6\}, y(\tau + T) = y(\tau)$$

ここで、 $w_{ij} = 1$ の場合、 i 番目のスイッチ S_i がオンとなり、 $w_{ij} = 0$ の場合、 i 番目のスイッチ S_i がオフとなる。

$T = 6N_p$ をDSNNの1周期とする。PSTの1周期は6個のサブインターバルに分けられる：

$$I_1 = [0, N_p), I_2 = [N_p, 2N_p), \dots, I_6 = [5N_p, 6N_p)$$

w_{ij} はそれぞれのサブインターバルで一定である。もし、 i 番目のDSNが j 番目のサブインターバル I_j ($w_{ij} = 1$) で選ばれたとすると、 I_j は S_i によって活性化されたという。それぞれのDSNは、それぞれのサブインターバルでスパイクを1つのみ出力する。DSNNは1基本周期 T 内に同位相のスパイクを出力できることや、1つのインターバルに複数のスパイクを出力することができる。これらは、単体のDSNでは実現できない。

例として、(14)の選択行列で与えられる、6周期PSTを出力するDSNを用いたDSNNの動作を図11に示す。

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

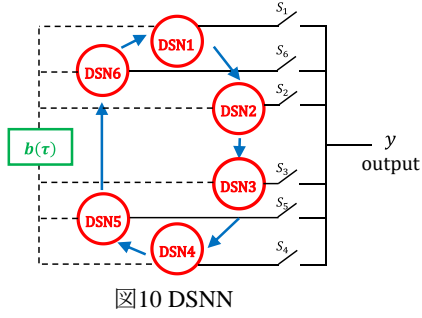


図10 DSNN

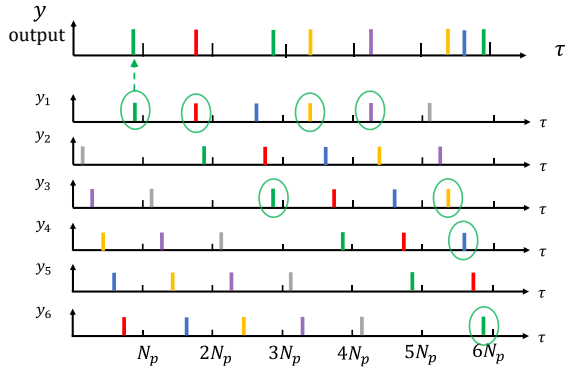


図11 DSNNの出力と6相同期現象

次に、DSNNをスパイク列近似に应用する、まず、教師信号を定義する。基本周期 $T = 6N_p$ 内の教師信号 $y_t(\tau)$ を以下に示す。

$$y_t(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{for } \tau = \tau_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$k \in \{1, \dots, Q\}, 0 < \tau_1 < \dots < \tau_Q < T$$

τ_n は n 番目のスパイク位置であり、 $y_t(\tau + T) = y_t(\tau)$ とする。 Q はスパイクの本数であり、教師信号は T 内に Q ほんのスパイクから成る。教師信号のスパイク位置は以下のように表現されるとする：

$$P = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_Q), 0 < \tau_1 < \dots < \tau_Q < T \quad (15)$$

次に、教師信号に最も近いスパイクを選択するシステムをDSNNに適用する。このシステムは、教師信号のスパイクが発火したとき、教師信号のスパイクとDSNNが出力するスパイクを比較し、教師信号に距離が最も近いスパイクを選択するものである。その選択されたスパイクを出力するDSNのスイッチをオンにすることで、自動的に教師信号に近いスパイクを出力することができる。この

システムにより、近似を行うための選択行列を適切に決めることができる。スパイク列近似を図12に示す。DSNNの出力するスパイク位置は以下のように表されとすると：

$$P' = (\tau'_1, \tau'_2, \dots, \tau'_Q), 0 < \tau'_1 < \dots < \tau'_Q < T \quad (16)$$

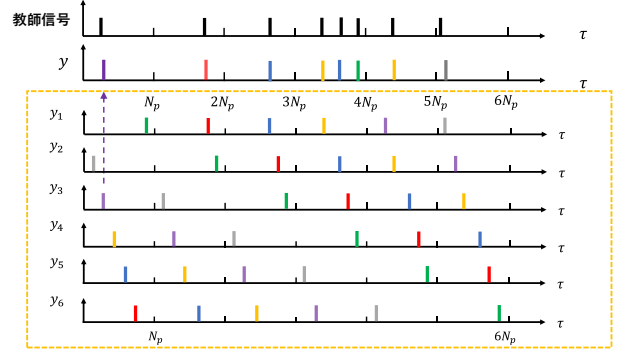


図12 スパイク列近似

本論文では、6周期スパイク列を出力する2つのDSNNの近似精度を比較する。図12に示すような2つのDmapを用いてDSNNのベース信号を決定する。図13の(a)をDmap1、(b)をDmap2とする。Dmapの表現するPSTはマップの下に記述されているPSTである。また、近似に使用される頻度が少ないDSNを順番に減らし近似を行う。減らし方は、スイッチがオン($S_i = 1$)の頻度が少ないDSNを出力層から切り離し、近似に使用するDSNを3つまで徐々に減らす。簡単のため、教師信号のスパイク列は、1つのサブインターバルで0〜3本のスパイクが現れるように調整をした。また、教師信号 $y_t(\tau)$ とDSNNの出力 $y(\tau)$ は同じ数のスパイクから成るとするため、スパイクを近似できない場合は考えないものとする。

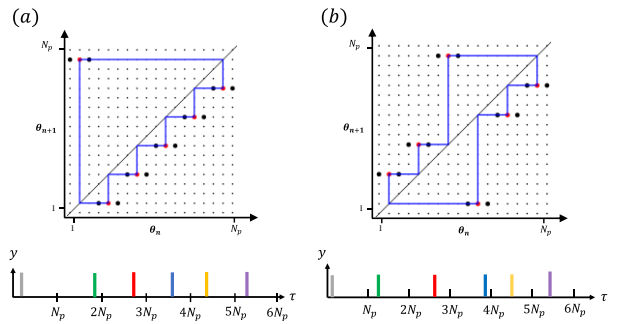


図13 6周期スパイク列 (a)Dmap1 (b)Dmap2

教師信号を変化させ、10回平均をとり、スパイク位置誤差(AVG of ϵ_p)、誤差の標準偏差(SD of ϵ_p)を測定した。スパイク位置誤差は以下の式で求める。

$$\epsilon_p = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q |\tau_k - (\tau'_k - \Delta)|, \Delta = \tau'_1 - \tau_1 \quad (16)$$

Dmap1の結果を表4.1, Dmap2の結果を表4.2に示す.

表1 Dmap1			表2 Dmap2		
#DSN	AVG ε_p	SD ε_p	#DSN	AVG ε_p	SD ε_p
6	0.91	0.22	6	0.91	0.22
5	1.02	0.25	5	1.10	0.30
4	1.46	0.30	4	1.50	0.48
3	2.20	0.61	3	2.41	0.68

#DSNは近似に使用するDSNの個数である. 測定結果から, DSNが6つの時は近似精度に差はないが, 近似に使用するDSNを減らしていくとDmap2の方が, 誤差が大きくなった. このことより, ベース信号の種類が近似精度に影響していることが分かった.

5. ハードウェア実装

DSN, 片方向リング結合, 双方向リング結合及びDSNNのハードウェア実装を行う. DSN は2つのシフトレジスタで構成される. また, 誘導発火結合はDフリップフロップ等を用いて実現できる. 図14にDSNの動作を示す. 図15に片方向リング結合の同期現象を示す. 図16に双方向リング結合の同期現象を示す. 図17にスパイク列近似の動作を示す.

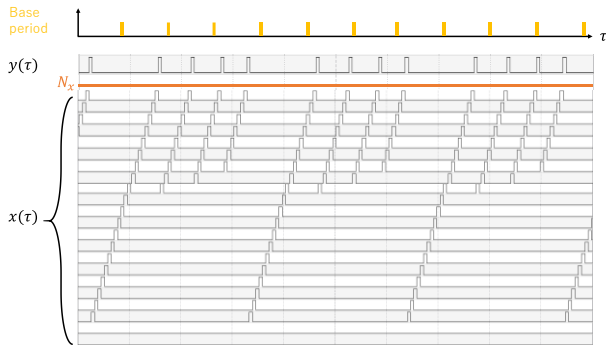


図14 DSN(FPGA)

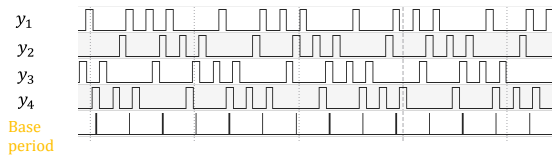


図15 片方向リング結合(FPGA)

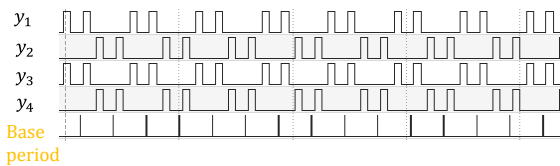


図16 双方向リング結合(FPGA)

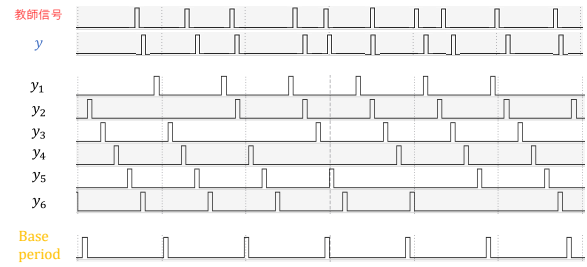


図17 スパイク列近似(FPGA)

6. むすび

デジタルスパイクニューロンを構成要素とするネットワークの同期現象解析・スパイク列近似への応用について考察した. デジタルスパイクニューロンは積分と発火を繰り返し, 様々な周期スパイク列を出力する. デジタルスパイクニューロンに誘導発火結合を適応することでネットワークを構築した. このネットワークはパラメータや結合の種類によって様々な同期現象を呈することを確認した. また, ネットワークを応用し, スパイク列近似を実現した. スパイク位置誤差を定義し, 近似性能について考察した. FPGAを用いてハードウェア実装を行い, 典型的な同期現象やスパイク列近似を確認した. 今後の課題として, 様々な同期現象の分類, 時系列近似予測への応用などが考えられる.

参考文献

- 1) E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, IEEE Trans. Neural Networks, 14, 6, 1569-1572, 2003.
- 2) E. M. Izhikevich, Dynamical systems in neuroscience. MIT Press, 2006.
- 3) H. Torikai, A. Funew, and T. Saito, Digital spiking neuron and its learning for approximation of various spike-trains, Neural Networks, 21, pp. 140-149, 2008.
- 4) H. Uchida and T. Saito, Multi-phase synchronization phenomena in a ring-coupled system of digital spiking neurons, IEICE Trans. Fundamentals, E102-A, 1, pp. 235-241, 2019.
- 5) H. Uchida, Y. Oishi and T. Saito, A simple digital spiking neural network: synchronization and spike-train approximation, Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S., doi: 10.3934/dcdss.2020374, 2020.
- 6) T. Iguchi, A. Hirata, and H. Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-pattern-division multiplexing, IEICE Trans. Fund., E93-A, pp. 1486-1496, 2010.
- 7) A. Lozano, M. Rodriguez, and R. Roberto Barrio, Control strategies of 3-cell central pattern generator via global stimuli, Sci. Rep. 6, 23622; doi: 10.1038/srep23622, 2016.